冷喷涂试件疲劳裂纹扩展规律试验研究

杨俊芬[1,2],曲凯[1],杨景林[1],谢坚[1]

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院,710055 西安;
2. 西安建筑科技大学结构工程与抗震教育部重点实验室,710055 西安)

摘　要:冷喷涂作为一种新兴的表面处理技术,广泛应用于增材制造和零部件修复等领域。为了探究冷喷涂处理后 Q355 钢基体的疲劳裂纹扩展规律,对 2 组标准单边缺口 3 点弯曲试样进行了冷喷涂处理。在光滑的 Q355B 钢基材表面分别沉积了纯 Al 和 A5052 铝合金涂层,然后对冷喷涂试件和一组未喷涂光滑试件进行了 3 点弯曲疲劳试验,得到了裂纹尖端张开位移和裂纹长度、裂纹扩展速率和荷载循环次数的规律曲线并进行了对比分析。结果表明:在裂纹扩展长度相同的情况下,冷喷涂试件和未喷涂试件的裂纹尖端张开位移基本相同,且随着疲劳裂纹的延伸,裂纹尖端张开位移也随之快速增大;在一定的裂纹尖端张开位移范围内,冷喷涂处理可以降低疲劳裂纹扩展速率;采用裂纹尖端张开位移作为疲劳裂纹扩展控制参数对冷喷涂试件的疲劳裂纹扩展规律进行判定是准确的,且裂纹尖端张开位移通过试验容易获得,简单方便,可以同时满足裂纹尖端弹性和塑性的情况。

关键词:冷喷涂;疲劳裂纹扩展规律;裂纹尖端张开位移;裂纹长度;裂纹扩展速率

中图分类号:TU391　　**文献标志码:**A　　**DOI:**10.11776/j.issn.1000-4939.2022.02.013

Experimental study on the fatigue crack growth law of cold sprayed specimens

YANG Junfen[1,2], QU Kai[1], YANG Jinglin[1], XIE Jian[1]

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, 710055 Xi'an, China;
2. Key Lab of Structural Engineering and Earthquake Resistance, Ministry of Education, Xi'an University of Architecture and Technology, 710055 Xi'an, China)

Abstract: As a new surface treatment technology, cold spraying is widely used in additive manufacturing and parts repair. To investigate the fatigue crack propagation law of the cold-sprayed Q355B steel substrate, two groups of standard single notched 3-point bending specimens were processed by cold spraying that pure Al and A5052 aluminum alloy coatings were deposited on the smooth Q355B steel substrate surface, respectively. Then a fatigue test was performed on the cold sprayed specimens and a group of unsprayed polished specimens to obtain and compare the relation curves between the crack tip opening displacement and crack length, the crack propagation rate and load cycles. The results show that the crack tip opening displacements of cold-sprayed specimens and unsprayed specimens are close when

收稿日期:2020-09-15　　**修回日期:**2020-11-25
基金项目:陕西省自然科学基础研究计划面上项目(No. 2022JM-308);陕西省教育厅服务地方专项科研计划项目(No. 21JC019)
通信作者:杨俊芬,副教授。E-mail:yjf9807@126.com
引用格式:杨俊芬,曲凯,杨景林,等. 冷喷涂试件疲劳裂纹扩展规律试验研究[J]. 应用力学学报,2022,39(2):291-296.
YANG Junfen, QU Kai, YANG Jinglin, et al. Experimental study on the fatigue crack growth law of cold sprayed specimens[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2022, 39(2):291-296.

the crack growth length is the same, and the crack tip opening displacement increases rapidly with the gradual fatigue crack growth. In a certain range of crack tip opening displacement, cold spraying can reduce the fatigue crack growth rate. It is accurate and reasonable to use the crack tip opening displacement as a fatigue crack growth control parameter to judge the fatigue crack growth law of cold sprayed specimens, and the crack tip opening displacement is easily obtained through test and can meet the condition of both the crack tip elasticity and plasticity.

Key words: cold spraying; fatigue crack growth law; crack tip opening displacement; crack length; crack growth rat

在航空航天、海洋工程、土木工程等领域中，金属结构与构件常承受循环往复荷载作用，往往发生疲劳破坏。由于疲劳破坏宏观塑性变形期不明显，结构破坏时难以采取应急措施，从而造成巨大的灾难和经济损失[1]。因此，研究钢结构、钢构件、钢节点乃至钢材的低周疲劳性能和疲劳裂纹的修复与延寿具有重要的工程意义。目前，国内外对结构钢疲劳性能试验研究的重点主要集中在疲劳裂纹扩展规律以及钢材强度等级、板件厚度、焊接技术、焊后处理方法等因素对疲劳性能的影响[2]，对建筑用钢的延寿处理方法研究不足。

前苏联科学院的 Papyrin 教授在进行风洞试验时发现了颗粒沉积现象，揭开了冷喷涂技术研究的序幕[3]。与传统热喷涂相比，冷喷涂不会造成裂纹、热残余应力、热收缩等一系列不利影响，已被广泛应用于航空、自动化、石油化工、陶瓷和玻璃制造等领域[4-5]。随着冷喷涂技术的发展，其应用领域逐渐扩展至改善金属基材疲劳性能的相关研究[6-8]。但当前该领域的研究多关注冷喷涂层的物性对基材疲劳强度及疲劳寿命的影响，对疲劳裂纹扩展过程中的变化规律则较少涉及。

文献[9]将疲劳裂纹扩展数据与应力强度因子幅关联起来，得到学术理论领域和工程应用领域的普遍认可，由此开创并奠定了疲劳断裂理论。在高周疲劳时，裂纹尖端塑性区尺寸远小于裂纹长度，应力强度因子也是控制疲劳裂纹扩展速率的主要参量，提出了著名的 Paris 经验关系式。但是，试验中往往发现在裂纹扩展中裂纹尖端存在少量的塑性变形，如果裂纹尖端区域大范围屈服或者处于全塑性状态，线弹性断裂力学中的应力强度因子场不能适用于研究裂纹尖端邻域的应力应变分量。Wells[10]提出的裂纹尖端张开位移 CTOD 理论，考虑裂纹尖端邻域的弹塑性应力应变场，以裂纹尖端处受张开型荷载后两表面所张开的相对距离，即 CTOD，作为控制参量来研究材料的疲劳裂纹扩展规律。

本研究通过基于 CTOD 理论的疲劳裂纹扩展模型对冷喷涂试件在低周循环荷载作用下的疲劳裂纹扩展规律进行了研究。首先在抛光处理后的 Q355B 钢标准单边缺口 3 点弯曲（SENB3）试样表面分别沉积纯 Al 和 A5052 铝合金涂层；其次，对冷喷涂试件和未喷涂光滑试件进行了 3 点弯曲疲劳试验，得到了裂纹尖端张开位移和裂纹长度、裂纹扩展速率和荷载循环次数的规律曲线并进行了对比分析，验证了以 CTOD 理论作为冷喷涂处理试件疲劳裂纹扩展判据的可行性和准确性。

1　低周疲劳裂纹扩展试验

1.1　试件设计

SENB3 试件按照《GB/T 6398－2017 金属材料疲劳试验 疲劳裂纹扩展方法》[11]进行设计和线切割加工，试件尺寸和形状如图 1 所示。试件采用 Q355B 钢材，其材料力学性能见文献[12]。试件加工完成后对其进行表面处理，按照表面处理方式不同将试件分为 3 组，各组 3 个试件：表面抛光处理（S-P-1～3），表面冷喷涂纯 Al 粉末（S-Al-1～3）和 A5050 铝合金粉末（S-A5052-1～3）处理。

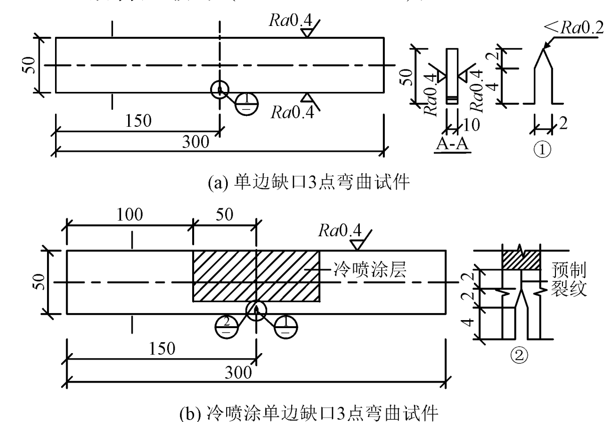


图 1　疲劳试验试件形状和尺寸

Fig. 1　Dimensions of specimen for fatigue test

SENB3 试样的冷喷涂处理采用俄罗斯奥布宁斯

克粉末喷涂中心(OCPS)研发的 DYMET 423 型低压冷喷涂装置,如图 2 所示。冷喷涂工艺参数如下:喷枪移动速率为 15 mm/s,喷嘴距基材表面距离为 12 mm,加速气体采用氮气,气体压强为 1 MPa,冷喷涂 A5052 铝镁合金粉末时气体加热温度为 300 ℃,冷喷涂纯铝粉末时气体加热温度为 200 ℃,送粉速率为 16 g/min[12]。



图 2 DYMET 423 型低压冷喷涂系统

Fig. 2 DYMET 423 low-pressure cold spraying system

冷喷涂粉末的粒度分布对其沉积效果有着决定性的影响。在进行冷喷涂前,采用 LS230/SVM + 型激光粒度分布测定仪对纯 Al 和 A5052 铝合金粉末进行粒度分布测定,结果见表 1[12]。可见,粉末颗粒的粒度标准差较小,表明粉末颗粒大小均匀,流动性好,利于涂层的沉积。

表 1 金属粉末粒度分布测定结果

Tab. 1 Testing results of metal particle diameters

粉末类别	粉末粒度/μm				
	平均值	中值	众值	平均值/中值	标准差
Al	22.25	22.65	21.70	0.982	1.658
A5052	14.71	14.24	14.94	1.033	1.747

由于存在实际加工误差,用于后续计算的尺寸采用实际试件尺寸,所以在试验前采用游标卡尺对 SENB3 试件的细节尺寸进行了测量,测点分布和测量结果分别如图 3 和表 2[12]所示。

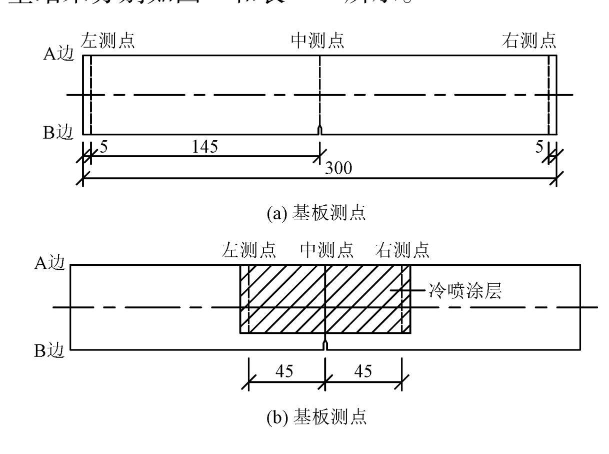


图 3 试件测点布置

Fig. 3 Layout of measuring points

表 2 试件厚度和高度实测值

Tab. 2 Measured width and height of specimens

试件编号	厚度均值/mm	高度均值/mm	涂层厚度均值/mm
S-P-1	8.97	49.27	0
S-P-2	8.52	49.33	0
S-P-3	8.70	49.25	0
S-Al-1	8.93	49.33	3.75
S-Al-2	9.01	49.28	3.69
S-Al-3	8.68	49.29	3.71
S-A5052-1	8.94	49.44	3.55
S-A5052-2	9.46	49.43	3.62
S-A5052-3	9.58	49.39	3.68

1.2 3 点弯曲疲劳试验

由于 CTOD 值 δ 不便于直接测量,故转化为测量裂纹嘴张开位移(CMOD)值 δ',如图 4 所示,图中,三角形为裂纹开口模型。根据图 4 可得二者转化关系为[13]

$$\delta_{n-1} = \delta_n' \frac{a_n - a_{n-1}}{a_n} \tag{1}$$

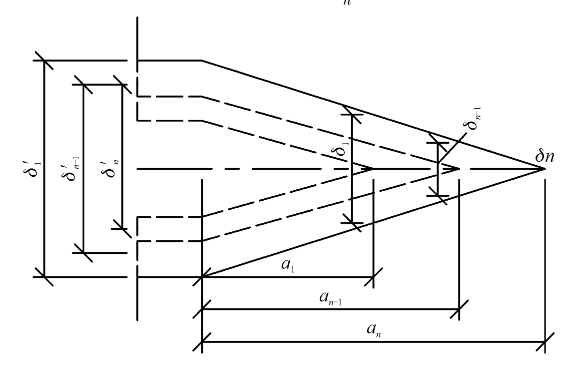


图 4 CMOD 和 CTOD 关系示意图

Fig. 4 Relationship between CMOD and CTOD

采用 SDS100 型电液伺服疲劳试验机进行疲劳裂纹扩展试验。采用试验系统自带引伸计固定在 3 点弯曲试件缺口两端实时跟踪记录并输出 CMOD。通过在裂纹尖端裂纹预扩展路径上粘贴毫米级刻度纸对裂纹长度随循环次数的变化进行测量,并通过架设在试件裂纹尖端的数码显微镜实时人工读取并记录裂纹扩展长度及对应的荷载循环次数。试验装置如图 5 所示。

相对于疲劳裂纹,3 点弯曲试件中的 V 型缺口还不够小,为了形成一条足够长且尖锐的平直裂纹,使得 K 标定计算式不受初始缺口形状的影响,同时避免后续的疲劳裂纹扩展试验不受裂纹前缘形状变

化或预制裂纹应力变化的影响，加载过程分为预制疲劳裂纹和裂纹扩展两个阶段。依据GB/T 6398—2017[11]，制定各阶段的加载方案如表 3 所示。

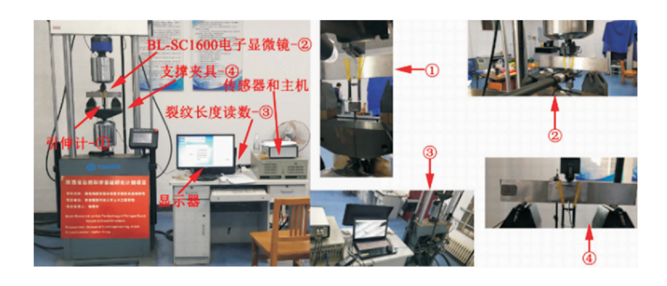


图 5　疲劳裂纹扩展试验装置

Fig. 5　Setup of fatigue test

表 3　疲劳裂纹扩展试验加载制度

Tab. 3　Loading scheme of the fatigue crack growth test

加载阶段	预制疲劳裂纹阶段	裂纹扩展阶段
最大荷载/kN	15	25
最小荷载/kN	1.5	2.5
应力比	0.1	0.1
荷载类型	正弦荷载	正弦荷载
加载频率/Hz	5	5

3 点弯曲疲劳裂纹扩展试验过程中的测量参数包括疲劳试验机的加载荷载 F、CMOD 值 δ'、裂纹扩展长度 a 和载荷循环次数 N。其中 F、δ'和 N 均通过试验数据采集系统自动采集，a 通过电子高倍显微镜在电脑端目测读数，读数方式为每隔 1 mm 读取疲劳试验循环次数并记录。然后依据柔度法，通过引伸计测得的 CMOD 值反算疲劳裂纹长度以进行修正。归一化裂纹长度与柔度的关系如下。

$$\frac{a}{W} = C_0 + C_1 U_x + C_2 U_x^2 + C_3 U_x^3 + C_4 U_x^4 + C_5 U_x^5 \quad (2)$$

式中：$C_0 \sim C_5$ 均为常数[14]，$C_0 = 0.999\ 75$，$C_1 = -3.950\ 4$，$C_2 = 2.982\ 1$，$C_3 = -3.214\ 1$，$C_4 = 51.516$，$C_5 = -113.03$；U_x 为柔度的表达式，即关于 CMOD 的函数。

$$U_x = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{EBV_x}{F} \frac{4W}{S}}} \quad (3)$$

式中：E 为试件弹性模量；V_x 为开口位移，即 CMOD；W 为试件的高度；S 为加载跨距。

2　试验结果与讨论

通过试验获得各组试件的 CMOD 值 δ'，按式(2)修正疲劳裂纹长度 a，然后根据式(1)计算 CTOD 值 δ。通过 ORIGIN 绘制各组试件的 δ-a/W 关系曲线，如图 6 所示。可见，δ 值随着疲劳裂纹的扩展而快速增大，原因在于：随着疲劳裂纹的扩展，涂层基板不断开裂，韧带尺寸不断减小，且由冷喷涂引起的基板表面裂纹尖端的残余压应力逐渐得到释放。各组试件的 δ-a/W 关系曲线之间离散程度较小，均处于一个较狭窄的带状区域内，表明所有试件在相同的裂纹长度时，其 δ 值基本相同。

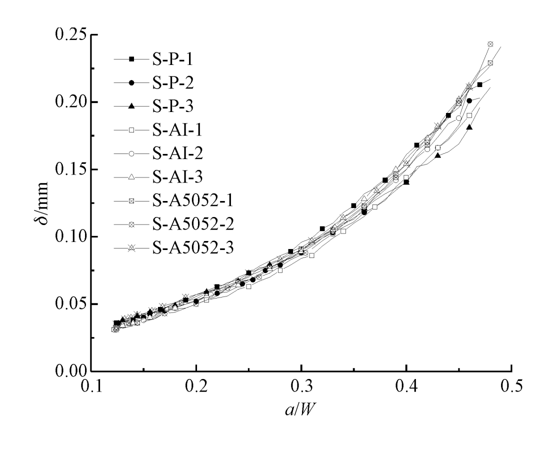


图 6　δ-a/W 关系曲线

Fig. 6　δ-a/W relation curves

为了研究疲劳裂纹扩展速率 da/dN 与 δ 的定性定量关系，将试验中同步的试验数据经过处理绘制于图 7 中。

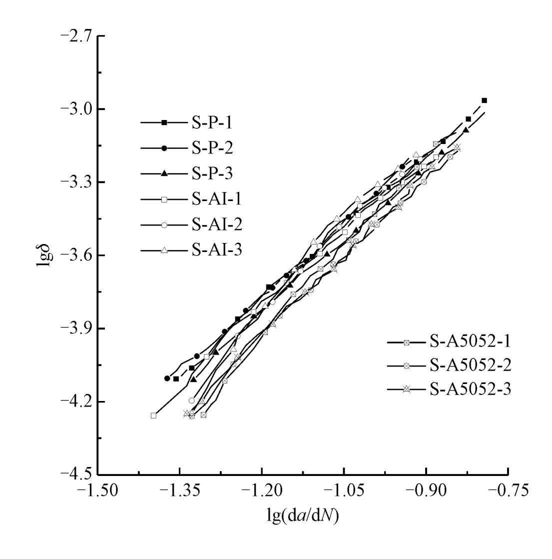


图 7　lg(da/dN)-lgδ 关系曲线

Fig. 7　lg(da/dN)-lgδ relation curves

Donahue[15]提出的以裂纹张开位移 δ 为准则参量的稳定扩展阶段疲劳裂纹扩展速率计算式为

$$\frac{da}{dN} = C_1 \delta^{\frac{m_1}{2}} \quad (4)$$

式中 C_1,m_1 为材料常数。为了便于数据处理,对式(4)两边取常数对数得到

$$\lg \frac{da}{dN} = \frac{m_1}{2}\lg\delta + \lg C_1 \tag{5}$$

图 8 为 da/dN 与 δ 在对数坐标下呈线性关系,拟合的参数与 Donahue 公式如表 4 所示。拟合直线与数据点的拟合优度决定系数 R^2 越接近 1,表明变量之间的拟合效果越好。对于 S-P、S-Al 和 S-A5052 试件,其 R^2 分别为 0.974 4、0.969 5 和 0.981 7,拟合优度较高。此外,S-Al 和 S-A5052 试件的拟合直线均在 S-P 试件的拟合直线之下,且在裂纹扩展初期直线高差较大,而随着裂纹的扩展对裂纹扩展速率的影响逐渐减弱,表明在一定 δ 范围内,冷喷涂处理可以降低疲劳裂纹扩展速率。

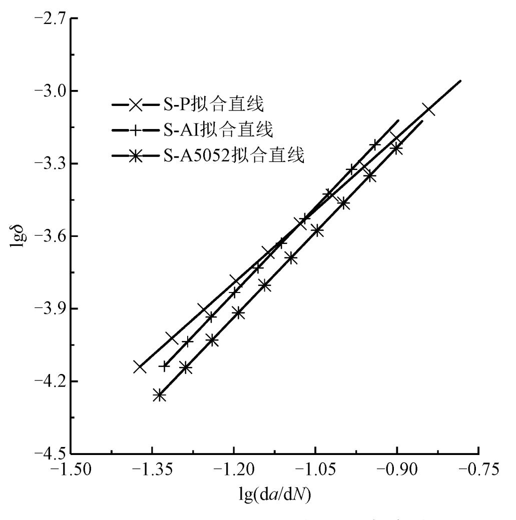


图 8 lg(da/dN)-lgδ 关系拟合直线

Fig. 8 lg(da/dN)-lgδ fitted relation lines

表 4 Donahue(Wells)公式及参数换算

Tab. 4 Donahue (Wells) equations and parameters

试件类别	$\lg C_1$	C_1	$m_1/2$	Donahue 公式	R^2
S-P	-1.920 3	0.012 0	0.690 8	$da/dN = 0.012\,0 \times \delta^{0.690\,8}$	0.974 4
S-Al	-1.151 3	0.070 6	1.113 2	$da/dN = 0.070\,6 \times \delta^{1.113\,2}$	0.969 5
S-A5052	-1.123 6	0.075 2	1.171 7	$da/dN = 0.075\,2 \times \delta^{1.171\,7}$	0.981 7

图 9 为 CTOD 与荷载循环次数 N 的关系曲线。可见表面冷喷涂处理可以提高试件的疲劳裂纹扩展寿命,与上述对 δ-a/W 和 lg(da/dN)-lgδ 关系曲线的趋势一致,说明采用裂纹尖端张开位移 δ 作为疲劳裂纹扩展控制参数对冷喷涂试件的疲劳裂纹扩展规律进行判定是准确的。

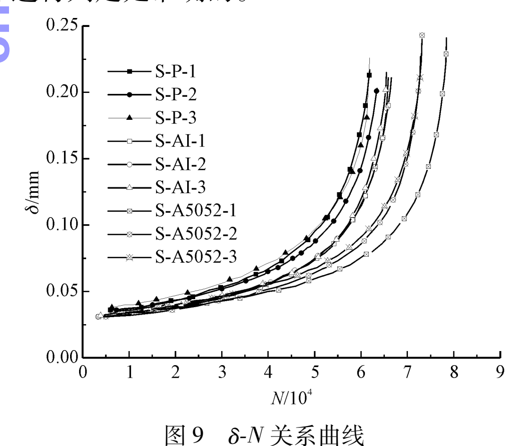


图 9 δ-N 关系曲线

Fig. 9 δ-N relation curves

3 结 论

本研究对冷喷涂试件的疲劳裂纹扩展规律进行了试验研究,基于 CTOD 理论对疲劳裂纹扩展试验结果进行对比分析,可以得到以下结论。

1)所有试件在裂纹扩展长度相同的情况下,CTOD 基本相同,且随着疲劳裂纹的逐渐扩展,CTOD 随之快速增加。

2)冷喷涂处理对裂纹扩展初期的裂纹扩展速率有较大影响,但随着裂纹的扩展影响逐渐减弱,表明在一定 CTOD 范围内,冷喷涂处理可以降低疲劳裂纹扩展速率。

3)采用 CTOD 作为疲劳裂纹扩展控制参数对冷喷涂试件的疲劳裂纹扩展规律进行判定是准确的,并且可以通过试验容易获得,简单方便,可以同时满足裂纹尖端弹性和塑性的情况。

参考文献

[1] 雷宏刚,付强,刘晓娟. 中国钢结构疲劳研究领域的 30 年进展[J]. 建筑结构学报,2010,31(增刊 1):84-91. (LEI Honggang, FU Qiang, LIU Xiaojuan. Research progress of steel structure fatigue in past 30 years in China[J]. Journal of building structures, 2010,31(S1):84-91(in Chinese)).

[2] 施刚,班慧勇,石永久,等. 高强度钢材钢结构研究进展综述[J]. 工程力学,2013,30(1):1-13. (SHI Gang, BAN Huiyong,

SHI Yongjiu, et al. Overview of research progress for high strength steel structures[J]. Engineering mechanics, 2013, 30(1): 1-13(in Chinese)).

[3] 王存龙,杨森,马冰,等. 冷喷涂技术及其在零件修复与功能涂层制备中的应用[J]. 焊接技术,2013,42(8):1-5.(WANG Cunlong, YANG Sen, MA Bing, et al. Cold spray technology and its application in parts renewal and preparation of functional coating [J]. Welding technology, 2013, 42(8): 1-5(in Chinese)).

[4] CAVALIERE P. Cold-spray coatings[M]. Berlin: Springer International Publishing, 2018.

[5] 卜恒勇,卢晨. 冷喷涂技术的研究现状及进展[J]. 材料工程,2010,38(1):94-98.(BU Hengyong, LU Chen. Research and development of cold spray technology[J]. Journal of materials engineering, 2010, 38(1): 94-98(in Chinese)).

[6] SANSOUCY E, KIM G E, MORAN A L, et al. Mechanical characteristics of Al-Co-Ce coatings produced by the cold spray process [J]. Journal of thermal spray technology, 2007, 16(5/6): 651-660.

[7] GHELICHI R, MACDONALD D, BAGHERIFARD S, et al. Microstructure and fatigue behavior of cold spray coated Al_{5052} [J]. Acta materialia, 2012, 60(19): 6555-6561.

[8] CIZEK J, MATEJKOVA M, DLOUHY I, et al. Influence of cold-sprayed, warm-sprayed, and plasma-sprayed layers deposition on fatigue properties of steel specimens[J]. Journal of thermal spray technology, 2015, 24(5): 758-768.

[9] PARIS P, ERDOGAN F. A critical analysis of crack propagation laws[J]. Journal of basic engineering, 1963, 85(4): 528-533.

[10] WELLS A A. Unstable crack propagation in metals: cleavage and fast fracture[C]//Proceedings of the crack propagation symposium. Cranfield: College of Aeronautics and Royal Aeronautical Society, 1961: 210-230.

[11] 钢铁研究总院. 金属材料 疲劳试验 疲劳裂纹扩展方法:GB/T 6398—2017[S]. 北京:中国标准出版社,2017.

[12] YANG J F, YANG J L, XIE J, et al. Improved fatigue crack propagation performance of Q355B steel with cold-sprayed A5052 and Al coatings[J]. Surface and coatings technology, 2019, 378: 125000.

[13] 夏紫君,苗张木,朱俊. EH40 钢疲劳裂纹扩展速率与裂纹尖端张开位移关系的试验研究[J]. 钢结构,2015,30(9):32-35.(XIA Zijun, MIAO Zhangmu, ZHU Jun. Experimental study on the fatigue crack growth rate and ctod values of EH40 steel[J]. Steel construction, 2015, 30(9): 32-35(in Chinese)).

[14] MENG X M, ZHANG J B, HAN W, et al. Influence of annealing treatment on the microstructure and mechanical performance of cold sprayed 304 stainless steel coating[J]. Applied surface science, 2011, 258(2): 700-704.

[15] DONAHUE R J, CLARK H M, ATANMO P, et al. Crack opening displacement and the rate of fatigue crack growth[J]. International journal of fracture mechanics, 1972, 8(2): 209-219.

(编辑　黄崇亚)